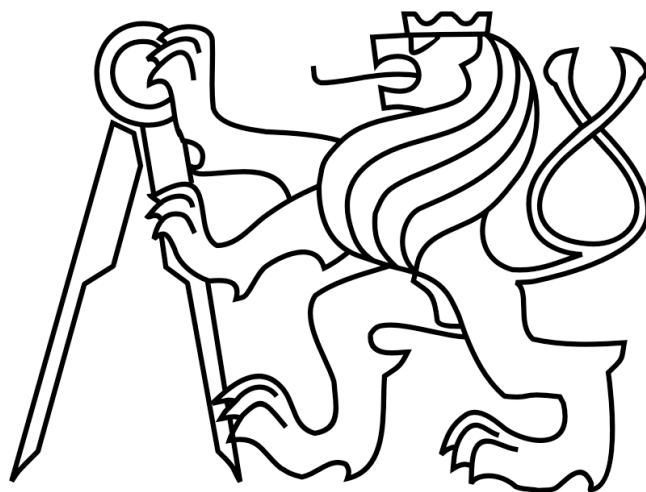


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA DOPRAVNÍ



TELEKOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

VOLBA PARAMETRŮ RÁDIOVÉ
DATOVÉ SÍTĚ PRO ŽELEZNIČNÍ
ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉM

AKADEMICKÝ ROK
2009/2010

JMÉNO, SKUPINA
MIROSLAV MATĚJŮ, 3 70

Obsah

1. Úvod	3
1.1. European Train Control System (ETCS)	3
1.2. Global System for Mobile Communications – Railway (GSM-R)	3
1.3. Kritika jednotných evropských systémů	3
1.4. Nástin alternativního řešení.....	4
2. Technické požadavky na bezdrátovou komunikaci.....	4
2.1. Přenosová rychlost.....	4
2.2. Dosah vysílání	4
2.3. Spolehlivost.....	5
2.4. Bezpečnost.....	5
2.5. Energetická náročnost.....	5
2.6. Ekonomika provozu	5
3. Způsob zajištění technických požadavků.....	5
3.1. Bezpečnost.....	5
3.2. Spolehlivost.....	5
3.3. Dosah vysílání a energetická náročnost	5
3.3.1. Výkon vysílače	6
3.3.2. Citlivost přijímače	6
3.3.3. Výška vysílací a přijímací antény, umístění a typ použitých antén	6
3.4. Volba kmitočtu	6
3.5. Volba modulace	6
3.5.1. Amplitudová modulace (AM)	7
3.5.2. Kvadraturní amplitudová modulace (QAM)	8
3.5.3. Frekvenční modulace (FM)	8
3.5.4. Fázová modulace (PM)	9
3.5.5. Digitální modulace	10
3.5.6. Diskrétní amplitudová modulace (ASK)	10
3.5.7. Diskrétní frekvenční modulace (FSK)	10
3.5.8. Diskrétní fázová modulace (PSK)	11
3.5.9. Porovnání modulací	11
4. Závěr.....	11
5. Zdroje.....	11
5.1. Texty.....	11
5.2. Obrázky.....	12

1. Úvod

V rámci projektu Krkonošské metro se účastním vývoje železničního zabezpečovacího systému pro regionální tratě, který by měl vycházet z myšlenek ETCS L3, ale zároveň klást důraz na nízkou cenu, aby bylo toto vybavení zajímavé pro potenciální odběratele ve středoevropském a východoevropském ekonomickém kontextu a mohlo se zde dočkat reálného nasazení. V rámci snížení ceny se počítá především s nahrazením *eurobalíz* a rádiového systému *GSM-R* levnějšími variantami.

Tento dokument se zabývá právě vývojem alternativního rádiového systému, a to na 0. a 1. vrstvě RM OSI, tedy prostředím šíření signálu a fyzickou vrstvou rádiové komunikační soustavy, kterou má vyvíjené zabezpečovací zařízení používat. Hlavní důraz je kladen na výběr nevhodnější modulace.

1.1. *European Train Control System (ETCS)*

Pod označením *European Train Control System*, tedy *Evropský systém ovládní vlaků*, rozumíme nyní vyvíjený železniční zabezpečovací systém, který by měl odstranit nejednotnosti na evropské železniční síti a usnadnit interoperabilitu železničních vozidel.^[1] Vlaková část systému je zcela sjednocena, v infrastrukturní části jsou navrženy 3 základní úrovně:

- **Level 1:** Na trati jsou umístěny přepínatelné balízy (informační body), které vlaku předávají informaci o jeho poloze na infrastruktuře a návěstním znaku nejbližšího návěstidla.
- **Level 2:** Na trati jsou umístěny neproměnné balízy, které vlak informují pouze o aktuální poloze na síti. Návěstní znaky, respektive oprávnění k pohybu (movement authority, MA) získává vlak prostřednictvím rádiové sítě GSM-R. Zjišťování volnosti tratě probíhá pomocí konvenčních zařízení – kolejových obvodů nebo počítačů náprav.
- **Level 3:** Od L2 se liší způsobem zjišťování volnosti. V této úrovni hlásí vlaky svou polohu a délku, na rozdíl od předchozích úrovní si ovšem také musí samy kontrolovat svou celistvost (že nedošlo k roztržení soupravy). Trať nemusí být vybavena prostředky pro zjišťování volnosti. Kvůli tomu, že zabezpečovací zařízení potřebuje informaci o poloze každého vlaku, je umožněn pouze provoz vozidel vybavených pro tuto úroveň. Přínosem této úrovně je kromě úspory prostředků pro zjišťování volnosti možnost kratších následných mezidobí, protože již nemusí připadat jeden vlak na jeden traťový oddíl, který má začátek a konec určen prostředky zjišťování volnosti.

1.2. *Global System for Mobile Communications – Railway (GSM-R)*

Názvem *Global System for Mobile Communications – Railway* označujeme standard mezinárodní bezdrátové komunikace pro aplikace na železnici.^[2] Stejně jako ETCS je součástí systému *European Rail Traffic Management System (ERTMS)*. Jak název napovídá, je GSM-R založeno na osvědčeném standardu GSM. Na rozdíl od něj garantuje funkčnost do rychlosti 500 km/h. Používá kmitočty, které GSM nevyužívá^[3], konkrétně 876–880 MHz pro uplink a 921–925 MHz pro downlink. GSM-R se dále oproti GSM vyznačuje pokročilou správou priorit, režimů volání (konferenční hovory atd.) a několika způsoby výběru volaného (pomocí čísla vlaku, vzdálenosti od volajícího a podobně).

1.3. *Kritika jednotných evropských systémů*

Výše uvedené systémy jsou bezesporu přínosné, především pro přeshraniční provoz důležitých vlaků, jako jsou vysokorychlostní vlaky TGV, ICE, vlaky vyšší kvality EC, IC a EN a nákladní

expresy. Problém těchto systémů z pohledu regionálních tratí je v tom, že kladou na všechna vozidla stejné, a to dost vysoké nároky, ať už se jedná o rychlovlak, nebo motorový vůz, který se za celý den provozu na lokální trati nepřiblíží rychlosti 100 km/h. Také na infrastrukturu kladou evropské systémy vysoké nároky, ať už jde o výstavbu základnových stanic GSM-R či vybavení tratí eurobalízami.

1.4. Nástin alternativního řešení

Právě proto je snaha v rámci projektu najít alternativu vhodnou pro regionální tratě. Drahé a technicky náročné eurobalízy, které vyrábí pár certifikovaných zahraničních firem, by se měly nahradit českými *Magnetickými informačními body* nebo jinou jednodušší technologií. Pokud jde o bezdrátovou komunikaci, je cílem vyjít spíše z analogového *Tratového rádiového systému* (TRS) než z GSM. Například finanční náklady na infrastrukturní část systému TRS jsou více než 4× nižší a na vozidlovou část více než 2× nižší než na odpovídající část systému GSM-R.^[5] Dále se snažíme vyhnout se nutnosti výstavby základnových stanic a komunikaci umožnit přímo mezi vysílajícím a přijímajícím zařízením. Také by se za účelem zjednodušení zařízení a díky nízkým datovým tokům neměla používat žádná forma multiplexu. Jediná výjimka je z důvodu zajištění bezpečnosti – je nutné posílat data (nejméně) dvakrát nezávisle na sobě. Stejná data by tedy měla být přenášena redundantně na dvou frekvencích, naopak data z různých zařízení mají proudit v různých časech na stejném kanálu. Toto uspořádání je pro zabezpečovací zařízení výhodné, protože každý prvek bude moci prostým sledováním komunikace ostatních získat přehled o dění na trati. Naopak množství dat nutných pro činnost zabezpečovacího zařízení je v porovnání s jinými dnes prováděnými datovými přenosy velice nízké.

2. Technické požadavky na bezdrátovou komunikaci

Projďeme si nyní technické požadavky na komunikační zařízení jeden po druhém:

2.1. Přenosová rychlost

Rádiem by měla být přenášena počítačová data. Depeše by měly obsahovat vždy identifikaci odesílatele a příjemce (po 3 znacích), příkaz a jeho parametry, případně zprávu o úspěšném splnění příkazu nebo chybě. Depeše by tak měly obsahovat průměrně 30 bajtů informace. Připustíme-li prodloužení v důsledku šifrování zprávy na dvojnásobek, budeme přenášet 60 bajtů. Delší by měly být pouze zprávy o stavu zařízení, které jsou ovšem pouze informativní, neboli mají nižší prioritu a nemusí být přeneseny ani rychle, ani v celku. Pokud bychom požadovali přenesení 10 depeší za sekundu (ve skutečnosti by měla být dostačující i 1, maximálně 2 depeše za sekundu), budeme potřebovat přenosovou rychlost 600 B/s neboli 4,8 kbit/s.

2.2. Dosah vysílání

Dosah, na nějž je možné zachytit vysílaný signál, by měl být ideálně v jednotkách až desítkách kilometrů. Je vhodné, aby systém nevyžadoval výstavbu základnových stanic ve funkci opakovačů jako síť GSM(-R), proto nesmí být dosah příliš malý. Naopak je zbytečné, aby byl dosah o hodně větší než je délka obsluhované trati. To by způsobilo rychlejší vyčerpání dostupných kanálů při nasazení plánovaného systému na mnoha místech. Z tohoto pohledu je nepříjemná liniová forma železniční tratě, tedy mnohem větší jeden rozměr (délka) obsluhovaného území než druhý (šířka). Proto bude nutné nalézt kompromisní řešení a případně využívat pevné rádiové stanice na trati (především v železničních stanicích) jako opakovače.

2.3. Spolehlivost

U bezpečnostní aplikace je nutná vysoká spolehlivost přenosu, zejména u naléhavých informací, jejichž nedoručení by mohlo vyústit v nebezpečný stav, tedy především informací o ztrátě dohledu (u výhybek, přejezdů apod.). V našem případě je výhodná závislost spolehlivosti a dosahu vysílání: S klesající vzdáleností, na niž je nutné naléhavou informaci přenášet, je nutná vyšší spolehlivost – pokud je vlak již blízko k výhybce, na niž je hlášena ztráta dohledu, je důležité mu tuto informaci co nejrychleji předat. Naopak u větších vzdáleností není spolehlivost rozhodující, protože je možné k úspěšnému přenosu celé informace použít opakované vysílání či využít pevné radiostanice jako opakovače (zesilovače).

2.4. Bezpečnost

Bezpečnost můžeme definovat jako míru odolnosti funkce vůči rušivým zásahům nebo jako míru pravděpodobnosti, že funkcí nebo poruchou zařízení nedojde ke škodám ani úhoně lidské společnosti.^[6] U zabezpečovacího zařízení jde o nejdůležitější vlastnost.

2.5. Energetická náročnost

V systému se uvažuje o ostrovním napájení některých komponent z fotovoltaických panelů. Proto je důležité minimalizovat příkon vysílačů a přijímačů. Ačkoli radiostanice každého subsystému bude muset být pravděpodobně v provozu neustále, dá se správnou volbou některých parametrů snížit spotřeba energie při zachování kvality vysílání.

2.6. Ekonomika provozu

Ekonomika provozu rádiové sítě se částečně kryje s energetickou náročností, ale uplatní se zde také povinné platby za využití rádiového spektra.^[11] Minimalizaci těchto nákladů lze provést minimalizací šířky pásma, které bude k provozování komunikační sítě potřeba.

3. Způsob zajištění technických požadavků

3.1. Bezpečnost

V řešených vrstvách RM OSI nelze bezpečnost zajistit. Bezpečnost musí být dána dodatečnými technickými prostředky na vyšších úrovních, například šifrováním, redundancí zasílaných dat a podobně.

3.2. Spolehlivost

Spolehlivost sítě lze v řešených vrstvách RM OSI zajistit především vysokou kvalitou výroby a odpovídajícím dimenzováním všech vysílačů a přijímačů zařízení. Prostředí šíření vln není u rádiového přenosu v naší moci ovlivnit, dá se očekávat rušivý vliv terénních nerovností a atmosférických poruch.

3.3. Dosah vysílání a energetická náročnost

Tyto parametry jsou provázané přes výkon vysílače. Spolu s ním ovšem dosah vysílání ovlivňuje mnoho dalších parametrů^[7], z nichž nejdůležitější jsou tyto:

- Výkon vysílače
- Výška vysílací antény
- Délka použitých napáječů (anténní přívody)
- Výška přijímací antény
- Umístění a typ použitých antén

- Použitý kmitočet
- Citlivost přijímače

3.3.1. Výkon vysílače

Výkon vysílače je určen výkonem koncového stupně.^[10] Při stejných ostatních podmínkách lze dosah nejjednodušeji zvýšit tak, že zvýšíme výkon vysílače, je-li to v jeho fyzikálních mezích. Tím ovšem současně stoupá příkon. Najít správnou úroveň výkonu bude definitivně možné až experimentálně přímo na místě určení. Především u ostrovně napájených subsystémů bude možná vhodně upravovat výkon vysílání individuálně v závislosti na okolním terénu a případně i na aktuálním stavu atmosféry.

3.3.2. Citlivost přijímače

Citlivost přijímače je vlastnost komplementární k výkonu vysílače. Při vyšší citlivosti přijímače je možné snižovat výkon přijímače a naopak. Citlivost je dána především konkrétní konstrukcí přijímače.

3.3.3. Výška vysílací a přijímací antény, umístění a typ použitých antén

Umístění vysílací antény ve větší výšce nad zemským povrchem umožňuje omezit vliv předmětů a terénních nerovností. V případě stacionárních vysílačů je možné umístit anténu na střechu budovy, případně na stožár zhruba ve výšce 10–20 m, v případě mobilních radiostanic je umístění antény omezeno normalizovaným obrysem vozidla na výšku 4,2–4,7 m nad temenem kolejnice.^[8] Tuto hodnotu lze přepočítat na výšku nad zemní plání železniční trati, ale výška nad okolním terénem se bude podél trati lišit podle toho, zda je trať umístěna na náspu nebo v zářezu.

3.4. Volba kmitočtu

Kmitočet modulované nosné vlny souvisí nejen s dosahem signálu, ale také s přenosovou rychlostí. Dosah je vyšší u nižších frekvencí, které se kromě povrchové vlny šíří také prostorovou vlnou, odráženou od ionosféry. Ionosférický odraz závisí kromě kmitočtu také na denní a roční době. Nejkratší vlny (tj. vlny s nejvyšším kmitočtem), které ionosféra odráží, mají kmitočet do 13 MHz, a to pouze v zimě a ve dne.^[9] Také u povrchové vlny roste útlum se zvyšováním nosné frekvence.^[10] Povrchová vlna se ovšem šíří na vzdálenost desítek až stovek kilometrů^[9], což by v našem případě mělo být dostatečné. Naopak přenosová rychlost roste lineárně s modulační rychlostí, která je dána jako *počet možných změn modulačních stavů za jednotkový čas*.^[9] Při vyšší nosné frekvenci je toto číslo vyšší.

Nejdůležitějším omezením při volbě kmitočtu je ovšem státní regulace – je možné používat pouze kmitočet přidělený Českým telekomunikačním úřadem buď přímo provozovateli rádiové sítě, nebo na všeobecnou licenci. Pro kritickou aplikaci, jakou železniční zabezpečovací technika bezesporu je, se předpokládá individuální oprávnění, aby příslušné pásmo nebylo obsazováno jiným signálem. Přidělení konkrétního kmitočtu bude tedy záviset především na rozhodnutí ČTÚ. Předpokládá se přidělení kmitočtů z pásem již nyní určených pro železnici, především z kmitočtů analogové komunikace, které se postupně budou uvolňovat přechodem hlavních tratí na GSM-R. Analogová hlasová komunikace na železnici funguje v pásmech 150 a 450/460 MHz.^[12]

3.5. Volba modulace

Modulace ovlivňuje dosah vysílání, přenosovou rychlost, energetickou náročnost a potřebnou šířku pásma neboli frekvenční rozsah. V námi uvažovaném případě rádiového přenosu dat je vždy nutné signál namodulovat na rádiovou nosnou vlnu^[13], která má harmonický průběh a je charakterizována svým kmitočtem.^[9] Průběh proudu nemodulované nosné vlny je dán vzorcem

$$i = A_n \cdot \sin(\Omega t' + \phi) ,$$

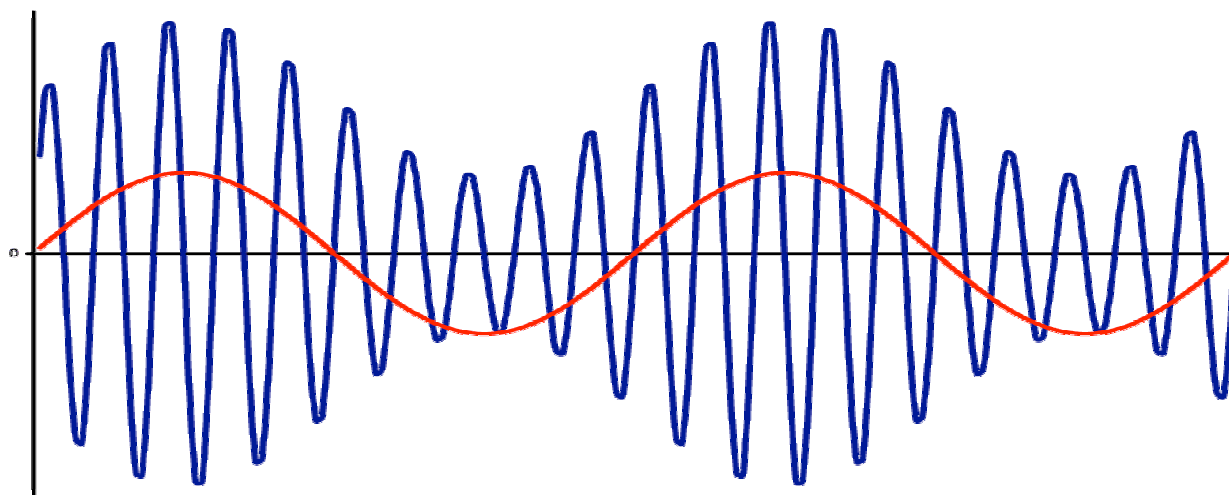
kde A_n je amplituda, Ω úhlová frekvence a ϕ fázový posuv nosné vlny.^[9] Parametry, které můžeme měnit, můžeme využít pro modulaci, a tedy přenos dat. Nabízí se tedy použití modulace amplitudové, frekvenční (kmitočtové), nebo fázové.

3.5.1. Amplitudová modulace (AM)

Při amplitudové modulaci dochází ke sčítání nosné vlny a signálu, přičemž signál má amplitudu i frekvenci nižší než nosná vlna. Průběh proudu po amplitudové modulaci se dá vyjádřit jako

$$i_{AM} = A_n [1 + m \sin(\omega t)] \cdot \sin(\Omega t' + \phi) ,$$

kde m je číslo z intervalu (0, 1) a ω úhlová frekvence modulačního signálu, který je v tomto případě uvažován harmonický.^[9] Při frekvenční analýze vzniklého proudového průběhu zjistíme, že kromě nosné vlny Ω se na vedení objevily frekvence $\Omega + \omega$ a $\Omega - \omega$. Při rozšíření této úvahy na neharmonický průběh modulačního signálu, tedy na obecné rozmezí úhlových frekvencí signálu ω_{min} až ω_{max} , zjistíme, že se ve frekvenční oblasti kolem nosného kmitočtu vytvoří dvě postranní pásma nesoucí modulovaný signál. Celková šíře pásma využitá tímto vysíláním má potom rozsah $(\Omega - \omega_{max}, \Omega + \omega_{max})$.^[9] Navíc části nesoucí signál, tedy intervaly $(\Omega - \omega_{max}, \Omega - \omega_{min})$ a $(\Omega + \omega_{min}, \Omega + \omega_{max})$, jsou redundantní, neboli přenášejí stejnou informaci. Tato varianta se anglicky nazývá *Amplitude modulation Dual Side Band (AM DSB)*^[13] a jedná se o nejstarší druh modulace signálu.



Kresba 1: Amplitudová modulace DSB bez potlačení nosné (modrá) a modulační signál (červená)

Amplitudová modulace vyžaduje oproti úhlovým modulacím (frekvenční a fázové) nejmenší šířku pásma.^[10] Filtrem nebo metodou modulace je možné nutnou šířku pásma dále snížit odstraněním jednoho postranního pásma nebo nosného kmitočtu. Toto řešení s sebou ovšem nese i nevýhody:

Nosný kmitočet je potřebný pro demodulaci. Buď ho demodulátor může využít z přicházejícího signálu, nebo z vlastního oscilátoru. Ten přitom musí generovat kmitočet co nejvíce podobný původní nosné vlně. Naopak využití nosného kmitočtu z vysílače umožňuje demodulátor velmi zjednodušit na článek nelineární impedance (diodu) a pásmovou, resp. dolní propust (RC článek).^[9]

Odstraněním jednoho postranního pásma zaniká redundance, která má právě v zabezpečovací technice časté využití. Zde je užitečná proto, že během přenosu působí na přenášený signál rušení, která se v každém postranním pásmu projeví jinak. Jejich následným porovnáním v demodulátoru dochází k zesílení původního signálu a omezení šumu.

Proto bude v našem případě nevhodnější zachovat nosnou frekvenci i obě postranní pásma, popřípadě redukovat (ale ne odstranit) nosnou frekvenci na úroveň, která bude dostatečná pro jednoduchou demodulaci, ale omezí se energie spotřebovávaná na přenášení vlastní nosné vlny bez užitečného signálu, která při výchozím stavu tvoří nejméně 2/3 celkové energie.^[10]

Amplitudová modulace se dále vyznačuje tím, že kolísá výkon vysílače podle toho, jaká je právě vysílána amplituda. Při nejvyšší amplitudě signálu ($m = 1$) je výkon $4\times$ vyšší než v okamžiku, kdy je signál nulový ($m = 0$).^[10] Všechny součásti vysílače musí být dimenzovány na nejvyšší výkon, který je možné dosáhnout, i když nebude vždy využit. Toto se ovšem týká především vysílačů s analogovým signálem, u binárního kódu se střídají pouze dvě možné hodnoty, z nichž jedna je prostě vyšší, a tedy i maximální.

3.5.2. Kvadrurní amplitudová modulace (QAM)

Kvadrurní amplitudová modulace je odvozena z amplitudové modulace a vyznačuje se zajímavou schopností přenášet na jednom kmitočtu dva signály, pro něž je využita nosná vlna o stejné frekvenci a obvykle i amplitudě, ale s vzájemným fázovým posuvem 90° .^[15] Tento typ modulace se v praxi používá u barevné televize, kde jsou tímto způsobem přenášeny informace o barvě. Pro námi uvažovanou aplikaci by tato modulace mohla být zajímavá tím, že by se o polovinu snížila nutná šířka pásma. Data musí být z důvodu bezpečnosti přenášena dvakrát nezávisle na sobě, což by se při použití kvadrurní amplitudové modulace dalo provést na jednom nosném kmitočtu. Problémem je zde ovšem právě zmíněná nezávislost – vzhledem k tomu, že je pro paralelně fungující počítače, které přenášená data vyhodnocují, vyžadováno i nezávislé napájení, pravděpodobně nebude možné použít pro data jeden (de)modulátor.

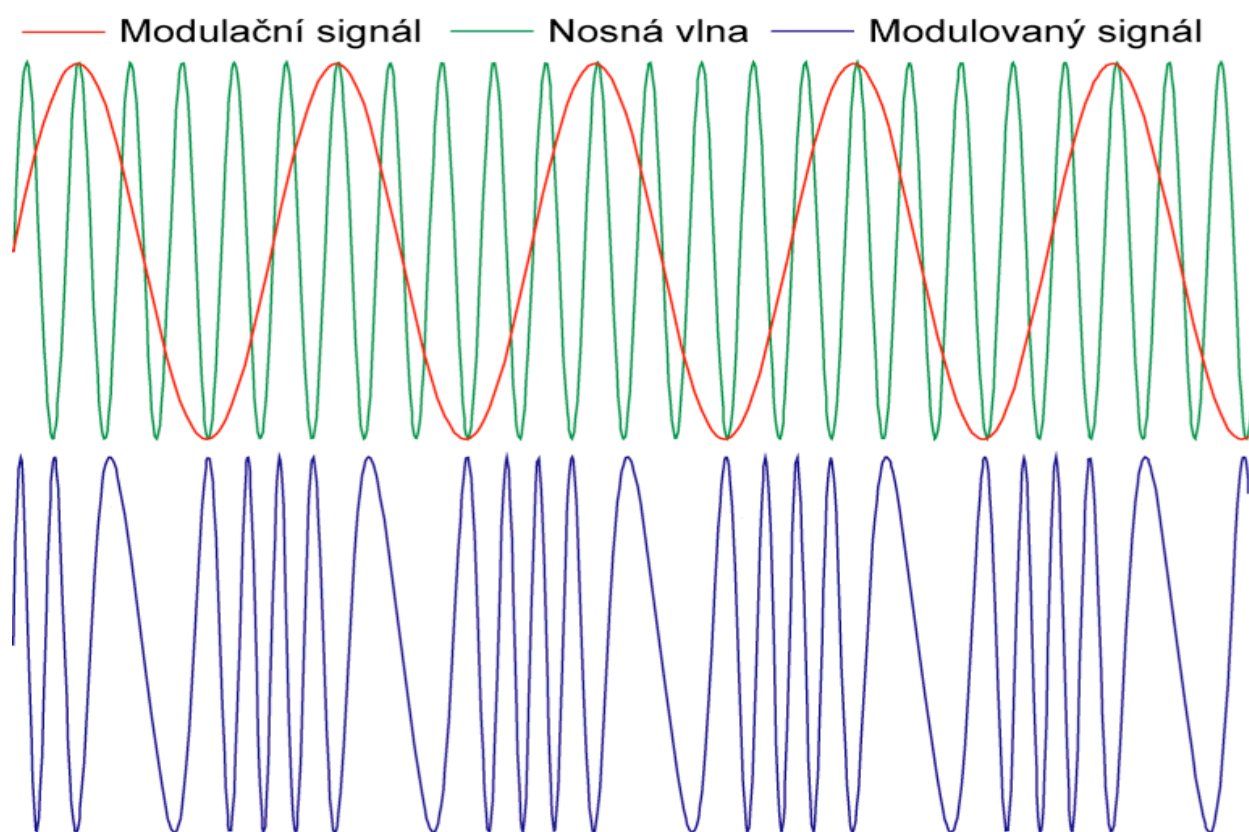
3.5.3. Frekvenční modulace (FM)

Frekvenční neboli kmitočtovou modulaci můžeme matematicky vyjádřit tak, že ve vzorci pro nemodulovanou nosnou vlnu nahradíme konstantní úhlový kmitočet nosné vlny Ω funkcí

$$\Omega = \Omega_n [1 + k \cdot \cos(\omega t')] ,$$

kde Ω_n je kruhový kmitočet nemodulované nosné vlny a k poměrná změna kmitočtu.^[9] Dále se zavádí *index kmitočtové modulace* m_{fr} ^[9] jako

$$m_{fr} = \frac{k \Omega_n}{\omega} .$$

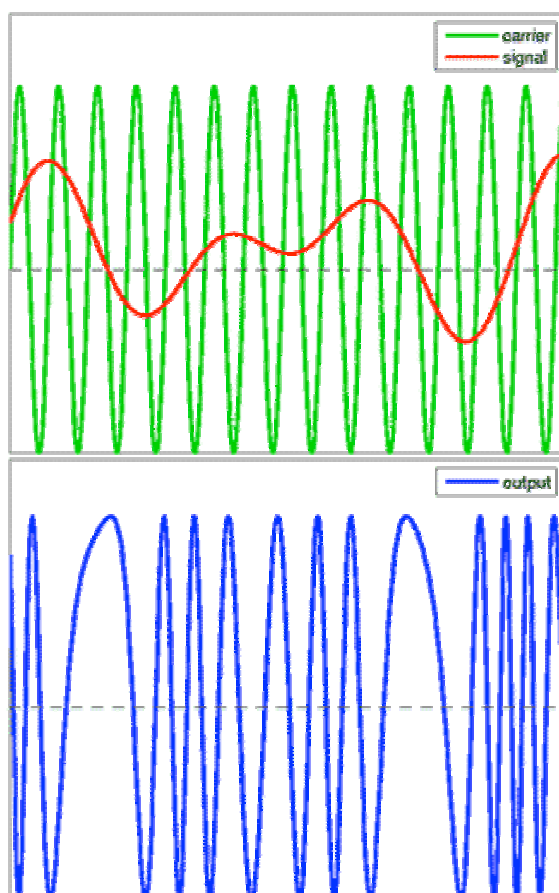


Kresba 2: Frekvenční modulace sinusového signálu

Kmitočtové spektrum užitečných modulačních produktů frekvenční modulace obsahuje teoreticky nekonečné množství párů postranních pásů, jejichž amplitudy klesají s rostoucí vzdáleností od nosného kmitočtu; strmost poklesu závisí na maximálním indexu kmitočtové modulace.^[10] K úspěšnému přenesení informace je třeba zajistit takovou šířku pásma, aby se přenášely tzv. podstatné složky, jejichž energie tvoří alespoň 1–10 % celkové energie.^[10] Používá se tedy jen několik postranních pásů, ostatní jsou odstraněna filtry. Nárok na šířku pásma je však vždy větší než u amplitudové modulace.^[9] Při použití větší šířky pásma je dosahován vyšší odstup signálu od šumu, ale je možné naopak přenášet pouze dvě postranní pásma stejně jako u amplitudové modulace.^[10]

3.5.4. Fázová modulace (PM)

Fázová modulace je v mnoha ohledech podobná frekvenční modulaci, například obě mění frekvenci nosné vlny a nikoli amplitudu. Proto se také zařazují pod společné označení *úhlové modulace*. Frekvenční a fázová modulace jsou provázány vztahem integrace a derivace. Pokud přenášený signál zintegrujeme a fázově namodulujeme, dostaneme frekvenčně modulovaný signál a naopak, pokud derivaci modulačního signálu pošleme do frekvenčního modulátoru, obdržíme fázově modulovaný signál.^[10] Pro analogové signály se fázová modulace nepoužívá kvůli nutnosti rekonstrukce nosné vlny v oscilátoru, přičemž je nutná vysoká kmitočtová i fázová stabilita.^[10] U diskrétních signálů již realizace referenční vlny nečiní nepřekonatelné potíže, i když je stále obtížná.^[10] Při fázové modulaci signálu obdélníkového průběhu, typického pro binární data, obdržíme nespojitý signál, u nějž se dá očekávat zkreslení.



Kresba 3: Fázová modulace analogového signálu

3.5.5. Digitální modulace

Dosud uvažované modulace se souhrnně označují jako analogové, protože předpokládají a umožňují zpracovat a přenést analogový signál, spojitý v hodnotách i v čase. Pro počítačová data, která mají pevně daný počet stavů a pro příslušný přenos i přenosovou rychlost, jsou k dispozici další druhy modulací, které se nazývají digitální, popř. diskrétní modulace.^[15] Ve skutečnosti se jedná o varianty stejnojmenných analogových modulací. Ve zkratkách se místo písmena M pro modulaci používají písmena SK z anglického „shift keying“.

3.5.6. Diskrétní amplitudová modulace (ASK)

Diskrétní amplitudová modulace je speciálním případem amplitudové modulace, u níž je omezen počet hodnot. Ten je dán omezeným počtem hodnot modulujícího signálu. Je to nejjednodušší způsob modulace digitálních dat na nosnou vlnu^[10], ovšem zároveň nejméně spolehlivý, protože amplituda přenášeného signálu může být snadno ovlivněna rušením.

3.5.7. Diskrétní frekvenční modulace (FSK)

Základní, dvoustavová varianta 2-FSK je díky svým vlastnostem velmi používaným způsobem modulace digitálního signálu.^[10] Přenášená vlna má konstantní amplitudu, což umožňuje vysílačům pracovat na plném výkonu s vysokou účinností.^[10] Na rozdíl od analogové frekvenční modulace zde není příliš složité obvodové uspořádání vysílačů a přijímačů a především lze zajistit malou chybovost i při problematickém šíření signálu, tedy únicích, odrazech nebo vícecestném šíření.^[10] K modulaci postačí přeladování oscilátoru řízeného napětím^[9], případně pro

dvoustavovou modulaci (2-FSK) přepínání mezi dvěma oscilátory na různých frekvencích.^[10] K demodulaci může být použit frekvenční diskriminátor, který není o moc složitější než demodulátor AM signálu.^[9] Složitější varianta FSK se speciálními vlastnostmi (GMSK) se používá v telefonní síti GSM. Pro zvýšení přenosové rychlosti byla ovšem v síti GSM technologií EDGE zavedena osmistavová fázová modulace (8-PSK).^[4]

3.5.8. Diskrétní fázová modulace (PSK)

Diskrétní fázová modulace umožňuje kódovat přenášené symboly do fázového posuvu. Kvůli omezené technické rozlišitelnosti fázi není možné přiřadit různé významy velkému množství různých fázových posuvů, proto se ke zvýšení počtu rozpoznatelných stavů používá kombinace s ASK.^[10] Diskrétní fázovou modulaci můžeme rozdělit na koherentní a rozdílovou (diferenční) variantu: Koherentní fázová modulace (CPSK) přiřazuje každému možnému stavu (symbolu) určitý fázový posuv signálu oproti referenčnímu.^[9] Přijímač tedy musí mít informaci o fázi referenčního signálu pro celou dobu přenosu. Rozdílová fázová modulace (DPSK) přiřazuje jednotlivým symbolům fázový posuv oproti předchozímu symbolu.^[9]

3.5.9. Porovnání modulací

Největší výhodou úhlových modulací je nižší vliv rušení na signál, protože rušení se projevuje především destabilizací amplitudy, která u úhlových modulací není nositelem informace. Frekvenční modulace také oproti amplitudové umožňuje získat nižší nelineární zkreslení a má vyšší energetickou účinnost.^[15] Při příjmu dvou signálů se stejnou nebo blízkou frekvencí se při frekvenční modulaci samočinně zdůrazňuje silnější (užitečný) signál a výrazně potlačuje slabší (rušivý) signál.^{[10][15]} To by mělo vést k větší imunitě vůči odraženému signálu.

Naopak nevýhodou úhlových modulací je větší potřebná šířka pásma a složitější zapojení modulátoru i demodulátoru.^[14] Jako příklad nutné šířky pásma se uvádí příklad rozhlasového kanálu o šířce 15 kHz. Pro tento užitečný signál bude potřebná šířka pásma následující:^{[9][14]}

- AM s přenosem obou postranních pásem 30 kHz
- AM s přenosem jednoho postranního pásma 15 kHz
- FM s indexem $m_f = 8$ 240 kHz

Pro přenos digitálního signálu jsou ovšem určité vhodnější digitální modulace, které jsou pro přenos číslicových dat přímo určené. Jako nejvýhodnější z nich se jeví frekvenční klíčování (FSK), které má celkem jednoduché zapojení vysílače a přijímače a nejmenší ovlivnitelnost rušením (změnou amplitudy) nebo například poruchou hodin (nepřesné určení fáze).

4. Závěr

V průběhu vypracování tohoto materiálu jsem zjistil, že většinu parametrů, které ovlivňují vlastnosti rádiového vysílání nelze za současného stavu vývoje projektu určit. To neplatí pro modulace, z nichž jsem porovnal analogové a digitální modulace a jako nejvhodnější pro potřeby zabezpečovacího zařízení jsem vyhodnotil digitální modulaci *klíčování frekvenčním posunem* (FSK).

5. Zdroje

5.1. Texty

[1] European Train Control System. *Wikipedie, Otevřená encyklopedie* [online]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/ETCS>>.

[2] GSM-R. *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/GSM-R>>.

[3] GSM frequency bands. *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM_frequency_ranges>.

[4] Enhanced Data Rates for GSM Evolution. *Wikipedie, Otevřená encyklopedie* [online]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Enhanced_Data_Rates_for_GSM_Evolution>.

[5] KOLÁŘ, Petr. Přejít od analogové k digitální komunikaci. In *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 2005, č. 20/2005. [cit. 2010-03-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTS/CLANKY/vts20/2003.pdf>>. ISSN 1214-9047.

[6] TICHÝ, Tomáš. *Bezpečnost a spolehlivost systémů: Diagnostika* [online]. 2005 [cit. 2010-03-30]. Dostupné z WWW: <http://www.lss.fd.cvut.cz/vyuka/bezpecnost-a-spolehlivost-systemu/Diagnostika/at_download/file>.

[7] *Jak daleko můžu vysílat*. Advanced Radio Telemetry spol. s r. o. [online]. Dostupné z WWW: <http://www.artbrno.cz/ostatni/jak_daleko.php>.

[8] *Obrys vozidel a průjezdný průřez* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.trminek.cz/view.php?navezclanku=obrys-vozidel-a-prujezdny-prurez&cislocclanku=2004080003>>.

[9] SVOBODA J., ŠIMÁK B., ZEMAN T. *Základy teleinformatiky*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 192 s. ISBN 80-01-01767-2.

[10] SYROVÁTKA Břetislav. *Rádiové vysílače a přijímače*. 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 200 s. ISBN 80-01-03236-1.

[11] *Zákon 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích*. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, 2005 [cit. 2010-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2005/sb043-05.pdf>>. ISSN 1211-1244.

[12] Traťové rádiové systémy na české železnici (Když se strojvedoucí nedovolá) *Želpage* [online]. Beroun, 2007. Dostupné z WWW: <<http://www.zelpage.cz/clanky/tratove-radiove-systemy-na-ceske-zeleznici-kdyz-se-strojvedouci-nedovola>>.

[13] Amplitudová modulace. *Wikipedie, Otevřená encyklopedie* [online]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Amplitudová_modulace>.

[14] SVOBODA, Jaroslav. *Telekomunikační technika*. 1. díl, Zprávy, signály, přenosová prostředí. 2. vydání. Praha: Sdělovací technika, 2000. 137 s. ISBN 80-901936-3-3.

[15] DOBEŠ J., ŽALUD V. *Moderní radiotechnika*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.

5.2. Obrázky

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AM-DSBFC.png>

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fmcs.png>

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phase_Modulation.png